

Desenvolvimento de gradientes estruturais através da indução de maclação mecânica e de transformação induzida por roleteamento profundo

Plano de Trabalho A

Projeto e plano de trabalho para bolsista - Mestrado

Bolsista a ser selecionado pelo PPGEMec- CCET

Orientador Supervisor Andrea Madeira Kliauga

Pesquisadores colaboradores: Prof. Dr.-Ing. Carlos E. Hirata Ventura (DEMec-UFSCar) ; Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere (DEMa- UFSCar) , Prof. Dr. Pedro A.R.C. Rosa (DEMec, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal)

1. Introdução

O roleteamento profundo é uma técnica recente de deformação plástica severa superficial, que pode ser classificada como processamento de acabamento pós-usinagem. O objetivo é criar um gradiente de tamanhos de grão e de deformação plástica da superfície para o centro de uma peça. A grande vantagem tecnológica é a incorporação do tratamento de superfície na manufatura de acabamento de componentes mecânicos estruturais a custo reduzido. No caso, uma esfera ou roletes de material duro é pressionada contra a superfície através de uma ponta de ferramenta em configuração de fresamento ou de torneamento, a compressão superficial aliada ao cisalhamento do movimento translacional induz a formação de uma camada de deformação plástica severa (DPS).

2. Enunciado do Problema

No mercado existem diferentes configurações de ferramenta com roletes ou esferas funcionando como superfície de contato, e ainda diferentes geometrias para deformação em superfícies internas de furações e cavidades, ou superfícies externas. Na configuração mais simples uma pequena esfera de elevada dureza (aço ferramenta, WC/Co, ou ponta diamantada) é posta em contato com o material, enquanto esse é rotacionado (configuração geométrica de torneamento), proporcionando assim uma deformação na superfície do material, conforme esquematizado na Figura 1. Nessa técnica, o controle da carga aplicada, e da rotação/deslizamento da peça tornam-se fatores fundamentais para determinar a profundidade efetiva e o grau da deformação plástica severa produzida [2-8]. As

configurações do processo facilitam a introdução dessa técnica como etapa pré- ou pós usinagem. O objetivo é criar um gradiente de deformação, que pode, dependendo do comportamento plástico do material e dos parâmetros de roleteamento, chegar a profundidades de 200-1000 μm , gerando um perfil de tensões residuais na região da sub-superfície, como mostra a Figura 1a.

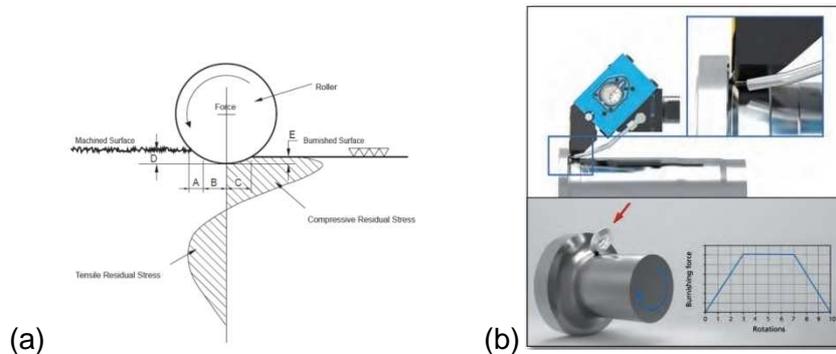


Figura 2. Ilustração esquemática do processo de roleteamento superficial em geometria de torneamento: (a) Perfil de tensões residuais no processo de roleteamento profundo [2]; (b) ferramenta em forma de rolete [3].

O processo recebe diferentes nomes na literatura: superficial grinding mechanical treatment, (SGMT), *deep burnishing* (roleteamento profundo) ou usinagem complementar, sendo que esta última denominação pouco utilizada. Se trata de uma abordagem relativamente recente e em desenvolvimento, com maior intensidade de projetos a partir dos anos 2000 e ainda muito pouco abordada no Brasil.

Em sendo tecnologia relativamente nova, há muitas perguntas a serem respondidas:

1. Configuração geométrica da ferramenta: É possível realizar a mesma tarefa com a ferramenta de corte tradicional? Essa variável deve levar em conta tanto o acabamento superficial quanto a profundidade da zona transformada e durabilidade da ferramenta.
2. Quais os parâmetros de operação nas configurações esfera - ferramenta de corte apropriadas para gerar estruturas gradientes em aços austeníticos de média-baixa EFE?
3. Quais as modificações microestruturais obtidas?
4. Qual a extensão de modificação microestrutural, atingida considerando temperatura, taxa de deformação e deformação total imposta no processo?
- 5; Qual o efeito do uso de criogenia no processo?
6. Quais os níveis de tensão residual atingidos pós conformação plástica?

7. Há modificação da resistência à corrosão após o tratamento de superfície?

8. Como adaptar as equações constitutivas para o caso da deformação superficial?

Os materiais de estudo serão o aço 201 LN e o seu equivalente no sistema Fe-Cr-Ni, o aço AIS 304. Variáveis de processo serão temperatura, profundidade, avanço e velocidade de rotação da peça. Pretende-se utilizar a configuração de torneamento como tratamento de superfície para aumento da vida em fadiga. Não encontramos referência de outro projeto financiado pela FAPESP associado a esse tema e em âmbito nacional o tema é inovador.

3. Resultados Esperados

Respondendo aos questionamentos levantados no tópico anterior, espera-se produzir um conjunto de dados que permita realizar a seleção de processo para o condicionamento superficial de aços austeníticos sujeitos a TWIP e TRIP em que parâmetros como temperatura, velocidade de deformação, geometria de ferramenta, profundidade de penetração possa resultar em melhoria das propriedades de superfície e de resistência à fadiga desses materiais. Ajudar a equacionar constitutivamente essa técnica de manufatura avançada.

4. Desafios científicos tecnológicos e meios e métodos para superá-los

4.1 Materiais

Materiais escolhidos para o estudo são aços inoxidáveis austeníticos das classes 201 LN (aço TRIP de baixo teor de níquel com adições de manganês, carbono e nitrogênio, SFE 12,4 mJ/m²) e 304L (aço TRIP ao cromo e níquel SFE baixo teor de carbono SFE 16 mJ/m²). O controle de temperatura durante o processo de deformação plástica superficial é essencial para o controle da microestrutura final. O aço 201LN está disponível na forma de chapas de 25 mm de espessura. O material foi fornecido pela APERAM e retirado em etapa intermediária do processo de fabricação. Será necessário adquirir o aço 304L.

Material	Cr	Mn	Ni	C	N	Mo	Si	Cu	S	P
201LN Aperam	17.0	6.9	4.0	0.03	0.15	0.02	0.4	0.02	0.001	0.03
304L	Será adquirido com verba do projeto									

Uma caracterização do comportamento mecânico em diferentes taxas de deformação e temperaturas deve ser levantada para o aço 304L a fim de fornecer

dados para estimativa do comportamento mecânico do material. O aço 201LN foi extensivamente caracterizado em projeto anterior do grupo de pesquisa.

4.2 Caracterização mecânica

Amostra de tração para ensaios com taxa de deformação de 10^{-3} e 10^{-2} serão realizados nas temperaturas de -100, -50, 25, 100, 300, 400 e 500 °C

Parte do desafio é a adaptação das equações constitutivas às condições de processamento, o que exigirá a caracterização do comportamento mecânico em altas taxas de deformação. Um período de estágio na Universidade de Lisboa em colaboração com o Prof. Dr. Pedro Rosa para uso de equipamento de impacto do tipo barra de Hopkinson desenvolvido naquele laboratório [18] está previsto para esse trabalho.

4.3 Deformação superficial

A modificação superficial será executada no departamento de engenharia mecânica da UFSCar e no Laboratório de Manufatura Avançada de EESC-USP. Serão utilizados os tornos CNC ROMI Centur 3D disponível no laboratório de processos de fabricação (LPF) do DEMec- UFSCar, uma ferramenta para roleteamento profundo adquirida com verba do projeto FAPESP ao qual este pedido de bolsa de mestrado está vinculado e um container para armazenamento de nitrogênio líquido pertencente ao LEPEN, DEMa, UFSCar e uma ferramenta de corte tradicional com inserto de WC-Co com geometria de corte projetada pelo grupo de pesquisa.

Variáveis a serem estudadas:

- *Tipo de ferramenta* [2,3,9]. Pretende-se comparar os resultados obtidos utilizando ferramenta na forma de rolete (a ser adquirida com verba do projeto ao qual essa proposta está vinculada) e insertos de metal duro (WC-5%Co) sem revestimento, com geometria SNMN 120412 (quadrados, neutros e com raio de ponta de 1,2 mm).

O trabalho experimental será desenvolvido em um torno CNC Romi Centur 30D (potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 3000 rpm) instalado no DEMec - UFSCar. Os materiais serão adquiridos na forma de barra circular com 25 mm de diâmetro.

- *Parâmetros de roleteamento*. Os estudos encontrados na literatura [4-11] trabalharam com profundidade de penetração entre 10 e 50 μm , velocidade de avanço entre 10 e 80 mm/min velocidades de rotação do material entre 80 e 600 rpm. Serão aplicadas as mesmas condições para as duas ferramentas. Inicialmente profundidades de 10-50 μm , rotação e velocidade de avanço serão adaptados às dimensões do material disponível mantendo a relação velocidade - avanço x rotação.

A caracterização microestrutural será realizada no DEMa- UFSCar através de perfis de microdureza, microscopia eletrônica de varredura e mapeamento cristalográfico realizado por EBSD em equipamentos disponíveis no LCE- DEMa, o perfil de rugosidade das peças será medido por microscópio confocal modelo Alicona Infinite Focus SL, equipamento multiusuário pertencente ao DEMec- UFSCar; as tensões residuais geradas no processo serão medidas por difração de raios-x através de colaboração com o laboratório de Difração de Raios-X do departamento de Engenharia de Materiais da EESC- USP o equipamento multi-usuário PANalytical MRD-XL com 4 círculos.

4.4 Resistência à corrosão

Qualquer modificação superficial em aços inoxidáveis deve garantir a manutenção da principal propriedade desses materiais que é sua resistência à corrosão.

A caracterização da resistência à corrosão para obter o potencial de corrosão, potencial de pite e densidade de corrente de passivação. Será utilizado potenciostato e software de aquisição de dados pertencentes ao Laboratório de Corrosão do DEMa - UFSCar. A célula eletroquímica do equipamento tem eletrodo de referência de $Ag/AgCl_{(KCl_{sat})}$ com área de trabalho de 1 cm^2 , e um contra eletrodo de platina. Será aplicado o procedimento padrão, com estabilização de 30 minutos de potencial de circuito aberto e início das curvas de polarização potenciodinâmicas com varredura de 1 mV/s até o potencial de ruptura. O eletrólito utilizado será uma solução de 3,5% de NaCl, à temperatura ambiente. Para cada condição serão realizados três ensaios.

5. Cronograma

Atividade	trimestre					
	1	2	3	4	5	6
1.Cursar disciplinas no programa de pós-graduação	x	x	x			
2.Aquisição de material de consumo e ferramental	x	x	x			
3.Aquisição dos materiais de trabalho	x					
4.Ensaio de usinagem complementar	x	x	x	x	x	
5.Exame de qualificação			x			
6.Ensaio de tração com temperatura e taxas de deformação variáveis, análise por DIC				x	x	x
7.Ensaio de roleteamento			x	x	x	x
8.Caracterização microestrutural por metalografia	x	x	x	x	x	x
9.Caracterização microestrutural por EBSD			x	x	x	x

10.Análise da deformação por Difração de raios-x		x	x	x	x	
11.Medidas de tensão residual				x	x	x
12.Medidas de dureza (perfis)	x	x	x	x	x	x
13.Ensaio de corrosão				x	x	x
14.Elaboração de relatório			x			x
15.Publicações			x		x	x
16.Defesa da Dissertação						x

Referências Bibliográficas

1. Y. Chongwen, J. Xinli, Z. Wenqian, W. Xuelin, Enhancing stress corrosion cracking resistance of machined surface via surface mechanical grinding treatment for AISI 316L stainless steel, *Mater Charact* 194 (2022), 112493
2. <https://yamasa.com.tr/323/2/6/yamasa/rx45filletcontourburnish.aspx>.
3. <https://www.ecoroll.de/en/products/single-roller-tools/eg45-concave-fillets-and-contours.html>
4. Tao Wu, Chengpeng Liu, Litao Chang, Hanxiao Wang, Lifeng Zhang, Xingtai Zhou, Understanding the surface grain refinement mechanisms for type 316L stainless steel during machining process via advanced microstructure characterization, *Materialia*, 31 (2023) 101866, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101866>
5. Meyer D, Brinksmeier E, Hofmann F (2011) Surface hardening by cryogenic deep rolling. *ProcediaEng* 19:258–263. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.109>
6. T. Oevermann, T. Wegener, On the Evolution of Residual Stresses, Microstructure and Cyclic Performance of High-Manganese Austenitic TWIP-Steel after Deep Rolling *Metals* (2019), 9(8),25; <https://doi.org/10.3390/met9080825>
7. T. Wegener, M. Krochmal, T. Oevermann, T. Niendorf. Consequences of Deep Rolling at Elevated Temperature on Near-Surface and Fatigue Properties of High-Manganese TWIP Steel X40MnCrAl19-2. *Appl. Sci.* 2021, 11(21), 10406; <https://doi.org/10.3390/app112110406>
8. Michael Gerstenmeyer, Benjamin-Lars Ort, Frederik Zanger, Volker Schulze. Influence of the cutting edge microgeometry on the surface integrity during mechanical surface modification by Complementary Machining *Procedia CIRP* 58 (2017) 55 – 60, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.185
9. Giselle Silva Macedo, Carlos Eiji Hirata Ventura ANÁLISE SUPERFICIAL DE PEÇAS TORNEADAS E ACABADAS POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA 12o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 10 a 12 de maio de 2023, Brasília, DF
10. G. Brock, J. Saelzea, D. Biermann. Finite element analysis of the surface finishing of additively manufactured 316L stainless steel by ball burnishing. *Procedia CIRP* 117, 287–292 (2023) 2212-8271 [10.1016/j.procir.2023.03.049](https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.049).
11. Silva C.M.A., Rosa P.A.R. e Martins P.A.F., An Innovative Electromagnetic Compressive Split Hopkinson Bar, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, doi:10.1007/s10999-009-9101-y, 5 (2009)281-288.